

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Hodnocení vlivu řezných parametrů při dělení  
materiálu laserem

Evaluation of Influence Cutting Parameters  
on Laser Cutting

Student:

Lukáš Vrabček

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. et Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph. D.

## Zadání bakalářské práce

Student: **Lukáš Vrabček**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie  
Téma: **Hodnocení vlivu řezných parametrů při dělení materiálu laserem**  
**Evaluation of Influence Cutting Parameters on Laser Cutting**

Zásady pro vypracování:

1. Analýza současného stavu technologie dělení laserem.
2. Vliv řezných parametrů na dělení laserem.
3. Návrh racionalizace řezných parametrů.
4. Hodnocení výsledné kvality řezů.
5. Závěrečné zhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:

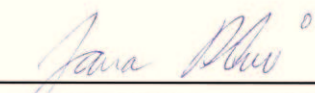
- [1] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 1. díl*. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007, s. 126. ISBN 978-80-248-1641-8.
- [2] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 2. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008, s. 150. ISBN 978-80-248-1822-1.
- [3] ČEP, R.; BRYCHTA, J.; SADÍLEK, M.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2007. s. 251. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [4] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábání*. Žilina : EDIS Žilina, 2007. s. 343. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [5] SHAW, Milton C. *Metal Cutting Principles*. 2nd edition. New York : Oxford University Press, 2005. 651. p. ISBN 0-19-514206-3.


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.**

Datum zadání: 13.12.2013  
Datum odevzdání: 19.05.2014



  
Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.  
vedoucí katedry

  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucí bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě ..... 19.5.2014 .....

.....  
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava ( dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 19.5.2014 .....



.....  
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Lukáš Vrabček

Adresa trvalého pobytu autora práce: Sazovice 57, Mysločovice, 76301

## **ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

VRABČEK, L. *Hodnocení vlivu řezných parametrů při dělení materiálu laserem: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2014, 45 s. Vedoucí práce: Petrů, J.

Bakalářská práce se zabývá metodou tepelného dělení materiálu laserem a vlivem řezných parametrů na výslednou kvalitu obráběné plochy. V teoretické části je popsán princip laserové technologie a její současný stav, faktory ovlivňující kvalitu řezu a parametry, jimiž hodnotíme řeznou plochu. Experimentální část je zaměřena na řezání hliníkové slitiny laserem při nastavení různých řezných parametrů. Na základě měření a vyhodnocení drsnosti povrchu jsou stanoveny vhodné řezné parametry pro daný materiál. Závěrem jsou porovnány výsledky měření vzorků řezané na pevnolátkovém laseru a plynovém CO<sub>2</sub> laseru.

## **ANNOTATION OF BACHELOR THESIS**

VRABČEK, L. *Evaluation of Influence Cutting Parameters on Laser Cutting: bachelor thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2014, 45 s. Thesis head: Petrů, J.

The bachelor thesis deals with the method of thermal laser cutting and cutting parameters influence on the final quality of the machina surface. The theoretical part describes the principle of laser technology and its current status, factors affecting the quality of the cut and the parameters by which we evaluace the cutting surface. The experimental part is focused on cutting aluminum alloy laser at settings of variol cutting parameters. On the basis of surface roughness measurement and evaluation are the appropriate cutting parameters for the material. Finally, the results are compared to measurements of samples cut to solid-state laser and CO<sub>2</sub> laser.

# Obsah

<b>Seznam použitých značek.....</b>	<b>8</b>
<b>Úvod .....</b>	<b>10</b>
<b>1. Současný stav laserového řezání .....</b>	<b>11</b>
1.1 Výhody a nevýhody laserového řezání .....	11
1.2 Porovnání CO <sub>2</sub> a pevnolátkového laseru.....	12
1.3 Ultrakrátké pulzy.....	13
1.4 Proces řezání laserem .....	13
1.4.1 Sublimační řezání .....	13
1.4.2 Tavné řezání .....	14
1.4.3 Oxidační řezání.....	14
1.4.4 Řezání s podporou vzduchu.....	14
<b>2. Faktory ovlivňující kvalitu laserového řezu .....</b>	<b>15</b>
2.1 Výkon a intenzita laseru .....	15
2.2 Pulzní nebo kontinuální vedení paprsku .....	15
2.3 Stálost výkonu .....	16
2.4 Průměr paprsku .....	16
2.5 Vlnová délka .....	17
2.6 Řezná rychlost.....	17
2.7 Druh a tlak plynu.....	17
2.8 Velikost trysky a odstupová vzdálenost .....	18
2.9 Fokusační čočka .....	18
2.10 Zohlednění všech parametrů .....	19
<b>3. Hodnocení kvality řezu laserem .....</b>	<b>20</b>
3.1 Úchylka kolmosti .....	20
3.2 Průměrná výška prvků profilu Rz5 .....	21
3.3 Skluz – “n“ .....	21
3.4 Zóna tepelně ovlivnitelné oblasti .....	22
3.5 Vady při řezání laserem .....	22
3.5.1 Rozšíření řezné spáry .....	22
3.5.2 Ulpívající struska.....	23
3.5.3 Zápaly (vruby) .....	25
3.5.4 Trhliny .....	25

3.5.5 Nepravidelná hloubka řezné stopy .....	25
3.6 Parametry drsnosti povrchu.....	26
<b>4. Návrh experimentu .....</b>	<b>28</b>
4.1 Zkušební materiál.....	28
4.2 Použité stroje a přístroje.....	29
4.2.1 Trumpf TruLaser 5030 fiber.....	29
4.2.2 Trumpf TC L3050 .....	30
4.2.3 Drsnoměr Mitutoyo Surftest SJ - 301 .....	31
4.3 Volba zkušební vzorku.....	31
4.4 Návrh metodiky experimentu.....	32
<b>5. Hodnocení výsledné kvality řezů .....</b>	<b>36</b>
5.1 Měření drsnosti.....	36
5.2 Měření velikosti otřepů .....	38
<b>6. Zhodnocení výsledků experimentu.....</b>	<b>39</b>
6.1 Závislost drsnosti Ra na řezných parametrech .....	39
6.2 Nalezení nejvhodnějších vzorků .....	41
<b>Závěr .....</b>	<b>42</b>
<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>43</b>
<b>Seznam příloh.....</b>	<b>46</b>

## Seznam použitých značek

Symbol	Význam	Jednotka
a	referenční přímka	[-]
A1	plocha výstupků	[ $\mu\text{m}^2$ ]
A2	plocha prohlubní	[ $\mu\text{m}^2$ ]
AR	průměrná rozteč prvků motivu drsnosti	[ $\mu\text{m}$ ]
b	skluzová čára	[-]
c	hloubka drážky	[mm]
CO <sub>2</sub>	oxid uhličitý	[-]
f	rozteč skluzových čar	[mm]
ln	celková vyhodnocovaná délka	[mm]
Lo	rozvinutá délka profilu	[mm]
lr	základní délka	[mm]
n	skluz	[mm]
N <sub>2</sub>	dvojjatomový dusík	[-]
NC	numericky řízený	[-]
o	velikost otřepu	[mm]
Pc	počet vrcholů profilu	[-]
Ppi	počet vrcholů profilu	[-]
R - profil	průměr výšek drsnosti hodnot každého motivu	[ $\mu\text{m}$ ]
R3z	základní hloubka drsnosti	[ $\mu\text{m}$ ]
Ra	průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
Rk	jádrová hloubka profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
Rm	mez pevnosti	[MPa]
Rp	výška nejvyššího výstupku profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
Rp0,2	mez kluzu, při hodnotě protažení 0,2%	[MPa]
Rpk	redukováná výška vrcholů profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
Rq	průměrná kvadratická odchylka posuzovaného profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
Rv	hloubka nejvyššího výstupku profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
Rvk	redukováná hloubka prohlubní profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
Rx	největší hloubka profilu nerovnosti	[ $\mu\text{m}$ ]



Ry	největší výška nerovnosti profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
Rz	největší výška profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
Rz5	průměrná výška prvků profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
S	střední rozteč místních výstupků profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
Sm	střední rozteč nerovností profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
mr	materiálový poměr profilu	[%]
Mr1	nejmenší materiálový poměr profilu	[%]
Mr2	největší materiálový poměr profilu	[%]
s	tloušťka plechu	[mm]
u	tolerance pravoúhlosti	[mm]
v	směr posuvu	[-]
$\delta c$	rozdíl výšky úseku profilu	[ $\mu\text{m}$ ]
$\lambda_C$	mezní vlnová délka pro měření drsnosti	[mm]
$\Delta S$	hodnota, o kterou se oblast tolerance pravoúhlosti zmenší	[mm]

# Úvod

Bakalářská práce byla vypracována ve společnosti MRB Sazovice s.r.o. se sídlem v Sazovicích u Zlína. Jde o českou výrobní společnost, která se zaměřuje na zámečnickou výrobu a služby v oblasti zpracování plechu.

Laser již překročil hranici 50-ti let své existence. Za tu dobu pronikl do všech možných odvětví lidské činnosti. Hlavní uplatnění nalézá v průmyslu, medicíně, elektronice a dalších oborech. S jeho pomocí je možné výrazně zvýšit kvalitu, technickou úroveň a produktivitu práce, což dnes patří mezi základní snahy strojírenských firem. Díky rychlému vývoji v poslední době se začínají čím dál více uplatňovat nekonvenční metody obrábění, kde je úběr materiálu založen na využití fyzikálně-chemických procesů. Zde patří i dělení materiálu laserovým paprskem, které umožňuje dosahovat takových parametrů výrobků, které dosavadními technologiemi nebylo možno dosáhnout.

Tato bakalářská práce se zaměřuje zejména na vliv řezných parametrů na výslednou řeznou plochu a následné hodnocení kvality řezu při dělení materiálu laserovou technologií. Teoretická část popisuje jednotlivé řezné parametry a dále se zabývá hodnocením řezu a jeho poruchami. Experimentální část ukazuje a popisuje kvalitu povrchu řezu získaných vzorků řezaných při různých parametrech. Porovnáním těchto výsledků byly stanoveny vhodné parametry, při kterých bylo dosaženo nejkvalitnějšího řezu.

# 1. Současný stav laserového řezání

Řezání laserem je v současnosti nejrozšířenější aplikací výkonných laserů ve strojírenství pro svůj úzký a přesný řez. Laserem lze dělit širokou škálu materiálů, jak kovové (uhlíkové a legované oceli), tak i nekovové materiály (např. keramiku, plastické hmoty apod.). [7]

Laserová technologie v oblasti strojírenství překročila práh plošného dělení a v současnosti proniká i do obtížnějších způsobů dělení. Na trh začínají pronikat lasery na obrábění trubkových profilů a 3D lasery.

Další ukázkou aktuálního stavu laserového řezání představuje stroj ByAutonom švýcarské firmy Bystronic. Jak již z názvu vyplývá, tento stroj automaticky vykonává některé rutinní operace, obvykle prováděné lidskými operátory laseru, jako je výměna řezné hlavy, výměna trysky a její vycentrování. Zde je nutné zdůraznit, že tyto operace se dějí nejenom programově – tedy pokud je v NC programu příslušná instrukce, ale stroj si pomocí senzoriky sám hlídá kvalitu řezu a v případě jejího poklesu je schopen sám si zařazovat automatické centrování řezné trysky. Stroj tak může pracovat opravdu bezobslužně. [12]

Mezi nejznámější výrobce strojů pro laserové řezání patří značky Trumpf, Bystronic, Amada, Adige a Prima.

## Laserem je možné řezat: [13]

- **kovy:** ocel, měď, hliník, bronz, stříbro, mosaz
- **nekovové materiály:** plast, guma, akrylát, papír, dřevo, překližka, korek, textil, kůže, pryž, kevlar a další

## 1.1 Výhody a nevýhody laserového řezání [10]

### Výhody

- vysoká přesnost řezaných dílů u slabých a středních tloušťek materiálů,
- řezání velmi malých otvorů, úzkých pásků, tvarů s ostrými úhly,
- velmi malé přivedené teplo, malé deformace obráběného kusu,
- velmi malá šířka řezné spáry (0,2 - 0,4 mm),

- vysoká řezná rychlost,
- lze řezat téměř všechny technické materiály.

#### Nevýhody

- vysoké pořizovací a provozní náklady,
- omezení tloušťky materiálu: konstrukční ocel do 25 mm, vysokolegovaná ocel do 15 mm, hliník do 10 mm,
- nutné přesné řízení vzdálenosti k povrchu obrobku,
- hrubý řez u řezání konstrukční oceli s vyšším obsahem Si a P,
- snížení stability procesu u řezání lesklých povrchů,
- menší účinnost (CO<sub>2</sub> - laser max. 10%).

## 1.2 Porovnání CO<sub>2</sub> a pevnolátkového laseru

Pro řezání laserem jsou nejrozšířenější zejména CO<sub>2</sub> a pevnolátkové lasery. Nejvýkonější stroje těchto dvou technologií dokáží řezat materiály o maximálních tloušťkách uvedených v tab.1.

Tab.1 Maximální tloušťky materiálu při řezání laserem [21]

Maximální tloušťky materiálu při řezání laserem		
Lasery zn. Trumpf	CO <sub>2</sub> TruFlow 6000	Pevnolátkový TruDisk 6001
Konstrukční ocel	25 mm	20 mm
Ušlechtilá ocel	25 mm	20 mm
Hliník	15 mm	20 mm
Měď	-	6 mm
Mosaz	-	6 mm

Tématem dneška je zda je výhodnější pořídit CO<sub>2</sub> laser nebo laser pevnolátkový. Rozhodujícím faktorem je zejména to, na co se výroba zákazníka specializuje. Z tohoto pohledu je CO<sub>2</sub> laser univerzálem. Řeže výborně jak silné, tak i tenké plechy. Pevnolátkový laser je specialistou na plechy tenké, kde se vyvyšuje oproti CO<sub>2</sub> laseru vysokou rychlostí. Další plus hovoří o možnosti řezání barevných kovů jako mědi a mosazi. Pokud však chceme opravdu pružnou výrobu, je nejlepší doplňování těchto dvou technologií mezi sebou. [20]

### 1.3 Ultrakrátké pulzy

V poslední době lze pozorovat prudký nástup výkonových laserů s ultrakrátkými pulzy i v oblasti strojírenství. I když se v dnešní době běžně využívá pulzní režim pro řezání malých otvorů a jemných kontur, pulzy mají délku v milisekundách ( $10^{-3}$  s). Naproti tomu ultrakrátké pulzy mají dobu trvání v řádu několika pikosekund ( $10^{-12}$  s) a střední výkon laseru je několik desítek až stovek wattů. Za těchto podmínek se dramaticky mění charakter interakce laserového pulzu s materiálem, kdy absorbovaný výkon způsobí okamžitou sublimaci v místě dopadu, ale vzniklé teplo se díky krátkosti pulzu již nestáhne šířit ani do bezprostředního okolí místa dopadu. To znamená v podstatě obrábění za studena, bez tepelného ovlivňování zbývajících materiálu. Samozřejmě, tento druh laserů lze využít pouze na dělení a obrábění tenkých materiálů, a to nejen kovů, ale i keramiky a nekovových fólií. [12]

Je zjevné, že lasery se v oblasti dělení materiálů velice dobře uplatnily. V dnešní době je tato technologie technicky a ekonomicky nezastupitelná a tento obor se velmi dynamicky rozvíjí. Další rozvoj laserových zdrojů v oblasti ultrakrátkých pulzů pak přináší další principiálně nové možnosti technologie. [12]

### 1.4 Proces řezání laserem

Řezání laserem je umožněno vysokou hustotou energie v místě dopadu laserového svazku na materiál. [1]

Při vlastním procesu řezání laserem v podstatě dochází ke třem různým procesům:

- sublimační řezání,
- tavné řezání,
- řezání plamenem.

Ve většině případů při laserovém řezání dochází ke kombinaci některých z těchto třech procesů.

#### 1.4.1 Sublimační řezání

Při sublimačním řezání je materiál z místa řezu odpařován. K tomu je potřeba vysoké intenzity laserového záření. Výhodou je velmi úzký a kvalitní řez ale naopak nevýhodou je vysoká energetická náročnost na odpaření měrného objemu. Proto se metoda používá

méně a hlavně tam kde potřebujeme vysokou kvalitu řezu. Zároveň se tak neřežou materiály o velké tloušťce. [9], [10],[14]

#### **1.4.2 Tavné řezání**

U tavného řezání se materiál nataví v řezné linii a je následně unášen od řezné linie pracovním plynem. Pracovní plyn může být inertní a v tomto případě je taven pouze z energie laserového paprsku. Řezná rychlost u této metody není tak vysoká a pohybuje se na nižší úrovni. [9], [10] ,[14]

#### **1.4.3 Oxidační řezání**

Jedná se o podobný způsob jako u tavného řezání ale používá se pracovní plyn s obsahem kyslíku, který reaguje exotermicky se základním materiálem, vzniká další energie, která zvyšuje účinnost procesu. Díky tomuto je rychlost řezání mnohem vyšší než u předchozí metody. Tento způsob řezání ale není vhodný pro přesné složité výrobky a malé otvory a vzniklý řez má i vyšší drsnost. [9], [10] ,[14]

#### **1.4.4 Řezání s podporou vzduchu**

Tento způsob řezání laserem je hybrid, který leží mezi tavným a oxidačním řezáním. Jako asistenční plyn je použitý vzduch.

Výhody:

- jednoduchá výroba stlačeného vzduchu,
- možnost výroby stlačeného vzduchu přímo na pracovišti,
- cenově výhodnější oproti dusíku a kyslíku.

Nevýhody:

- větší omezení řezané tloušťky materiálu,
- dosažení horší kvality řezné plochy.

## **2. Faktory ovlivňující kvalitu laserového řezu**

Výslednou kvalitu řezu pod dělení materiálu laserem ovlivňuje hned několik parametrů. Jednak to jsou faktory, kterými stroj disponuje z hlediska možností a konstrukce a dále parametry, které lze ovlivnit nastavením.

### **2.1 Výkon a intenzita laseru**

Výkon laseru je celková energie vyzařovaná ve formě světla za sekundu. Pro různé druhy a tloušťky materiálu nastavujeme různé výkony laseru. Maximální tloušťka materiálu je závislá na maximálním výkonu. [8]

Intenzita laserového paprsku je rovna podílu jeho výkonu a plochy, na kterou energii soustředí. Vysoká intenzita způsobuje, že se materiál rychle zahřívá, takže je k dispozici málo času pro rozptýlení tepla do okolí materiálu. To vytváří vysoké řezné hodnoty a vynikající kvalitu řezu. Intenzita laseru také určuje tloušťku, kterou lze řezat. Čím je materiál silnější, tím je nutná vyšší intenzita. Vyšší intenzity lze dosáhnout zvýšením výkonu laseru, nebo nastavení kratší ohniskové vzdálenosti fokusační čočky. Vysoká intenzita může být dosažena jak v pulzním, tak ve spojitém vedení paprsku. [8]

### **2.2 Pulzní nebo kontinuální vedení paprsku**

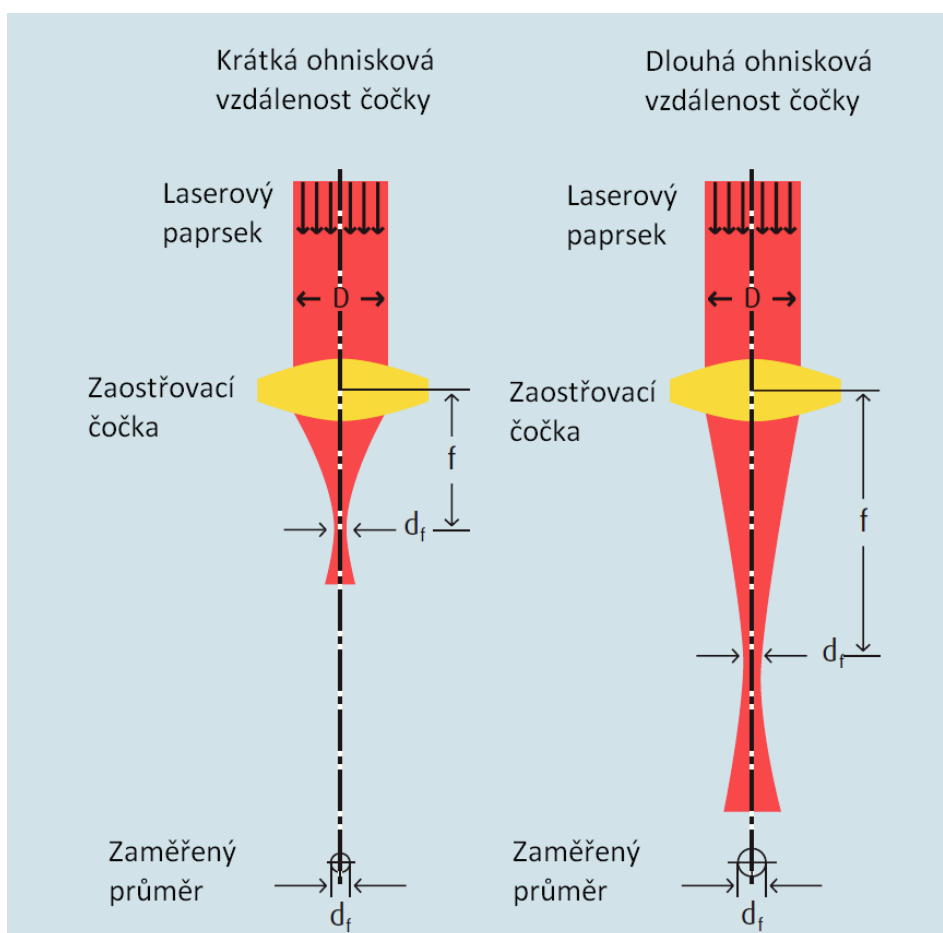
Nejvyšší řezné rychlosti lze získat na vysokotlaké úrovni v režimu kontinuálních vln. Spojité vedení paprsku způsobuje to, že výkon laseru je konstantní bez přerušení v celém průběhu času. Při řezání malých otvorů do silnějších materiálů je zvláště obtížné dosáhnout přijatelných řezných vlastností s vysokým výkonem kontinuálního vlnění. V takových případech může pulzní zpracování produkovat lepší řez. Vysokotlaká energie v krátkých pulzech zajišťuje zahřívání s efektivním odstraněním horkého materiálu z řezu. Řezné rychlosti v pulzním režimu jsou mnohem nižší, než u kontinuálního vedení paprsku. Průměrný výkon musí být obvykle snížen na několik set watů, aby se při pulzování dosáhlo významného zvýšení kvality řezu. To má často za následek snížení rychlosti, které je pouze 10 % z rychlosti dostupné při kontinuálním řezání. [8], [6]

## 2.3 Stálost výkonu

Kvalita řezu závisí také na konstantnosti předvoleného výkonu během celé doby opracování obrobku. Laser potřebuje po zapnutí cca 10 minut pro vytvoření konstantního výkonu. Pokles výkonu laseru způsobuje poruchy v řezu. Příčinou může být opotřebení výbojek, znečištění interního a externího optického systému a kvalita vody. [8]

## 2.4 Průměr paprsku

Čím větší je průměr laserového paprsku, tím je dosažitelný menší průměr fokusu a tím i menší řezná spára. Průměr fokusu však závisí také na ohniskové vzdálenosti použité fokusační čočky. Fokusační čočky s ohniskovou vzdáleností 5'' umožňují průměr fokusu  $< 0,12\text{mm}$  a čočky 7,5'' průměr  $< 0,2\text{ mm}$ . [8]



Obr.1. Focusace laserového paprsku [8]



## 2.5 Vlnová délka

Vlnová délka laserového paprsku ovlivňuje absorpci řezu v kovu. Proto je důležitá odrazivost materiálu, což je poměr množství odražené energie vůči energii dopadající. Což vede k problémům např. při řezání čistého hliníku, který má vysokou odrazivost. Absorbce CO<sub>2</sub> laseru laserového záření studené oceli je 15 % v tom smyslu, že se odráží 85 % záření. Absorbce záření pevnolátkového laseru je 25 %. Vysokou počáteční odrazivost lze překonat za předpokladu, že intenzita zaostřeného paprsku je dostatečně vysoká. Absorbce se výrazně zvyšuje, když teplota materiálu stoupá. [8]

## 2.6 Řezná rychlost

Je stanovena průměrnou úrovní výkonu laseru. Čím vyšší je průměrný výkon, tím vyšší je rychlost řezu. Řeznou rychlost nastavujeme dle druhu obráběného materiálu a jeho tloušťce. Příliš malá nebo naopak příliš vysoká rychlost způsobí poruchy řezu. [8]

## 2.7 Druh a tlak plynu

Použitý řezný plyn je rozhodující pro výsledek řezání. Kyslík přináší dobrý řezný výkon u uhlíkových a nízkolegovaných ocelí. Avšak kyslík reaguje se základním kovem a hrana řezu je pokryta vrstvou kovu. To jsou důvody, proč jsou vysocelegované oceli řezané dusíkem. Dusík se také čím dál více používá pro díly, které jsou následně práškované. Jakékoliv oxidy na řezné hraně snižují vazbu mezi povlakem a materiálem, a proto může dojít ke korozním problémům. Tlak plynu se musí přizpůsobit tloušťce materiálu obrobku. [8]

Obecné pravidlo pro řezání měkké oceli s kyslíkem: [8]

- čím silnější materiál, tím menší tlak,
- maximální tlak cca. 6 bar.

Obecné pravidlo pro řezání měkké oceli s dusíkem: [8]

- čím silnější materiál, tím vyšší tlak,
- minimální tlak cca. 8 bar.

## 2.8 Velikost trysky a odstupová vzdálenost

Asistenční plyn je v řezání laserem nezbytný. Proto je důležitá geometrie trysky a její vzdálenost od materiálu. Konstrukce trysky a dynamika proudění přes trysku se výrazně liší při různých tepelných procesech řezání. Průměr trysky je vždy větší, než šířka řezu pod ní. Vzdálenost trysky od plechu musí být vždy stejná, což může dělat problémy při použití křivého plechu. Dnešní stroje jsou již vybaveny senzorikou, která si vzdálenost hlídá. Odstupová vzdálenost pro standartní trysky by měla být menší, než je průměr trysky, protože s větší vzdáleností se můžou objevit tlakové změny a turbulence. Velké problémy mohou nastat po znehodnocení trysky po kolizi. Oválný tvar nebo jinak zdeformovaný otvor trysky se projeví zejména v místech změny směru. Při řezání kyslíkem, používáme trysky o průměrech 0,8-2,0 mm zatímco při řezání dusíkem 1,7 – 3,0 mm. [8]



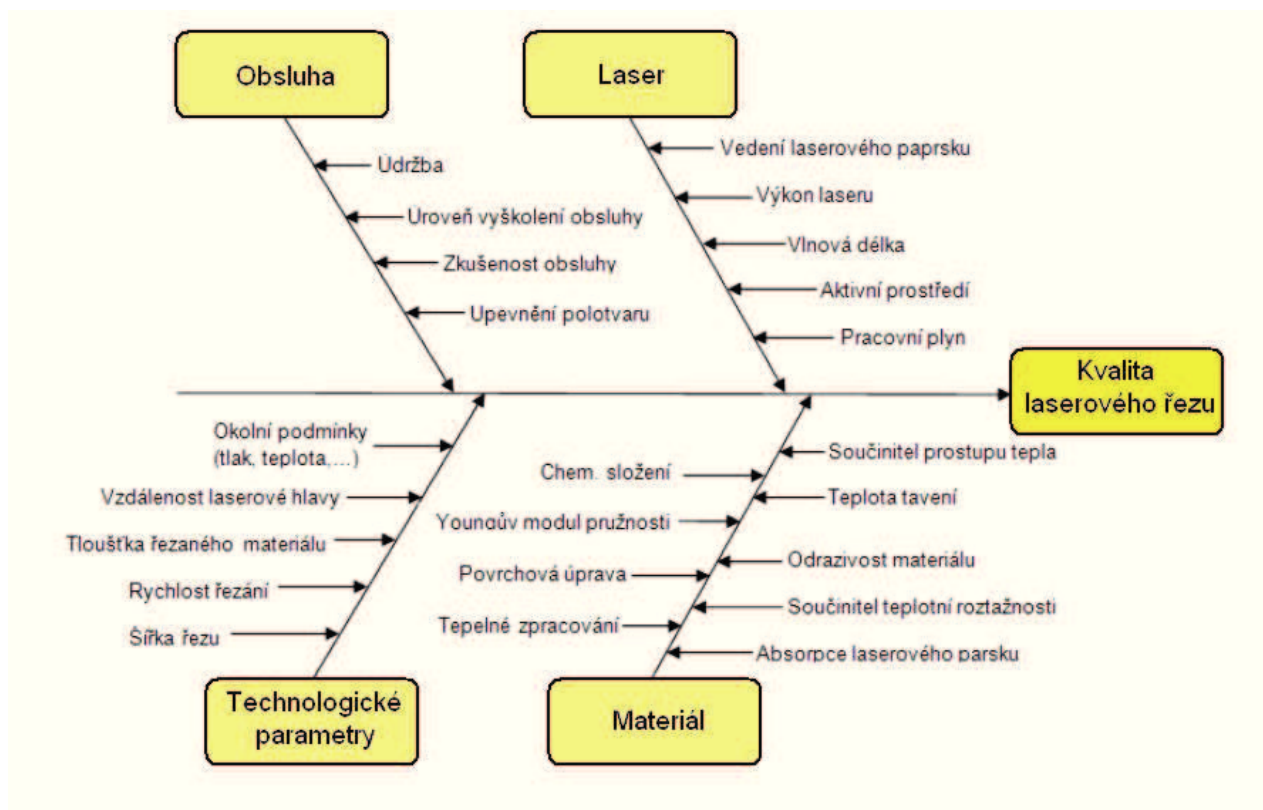
Obr.2 Trysky s keramickým dílem [17]

## 2.9 Fokusační čočka

Znečištění čočky vede k jejímu zahřívání. Toto zahřívání mění její lomivost, což poznáme při náhlém a výrazném zhoršení řezu. Následně je nutné čočku vyčistit a v horším případě vyměnit. [8]

## 2.10 Zohlednění všech parametrů

Do výsledné kvality řezu, vzniklého laserovým dělením, promlouvá mnoho faktorů a parametrů, které můžeme zařadit do oblastí, s kterými souvisí, a to s laserem samotným, obsluhou, řezaným materiálem a technologickými parametry při řezání (obr. 3). Výběr a vlastnosti těchto parametrů ovlivňují konečnou kvalitu řezu a tím celkovou produktivitu a velikost nákladů na výrobu. Na následujícím obrázku můžeme vidět diagram sestavený pro laserové řezání na základě diagramu příčin a následků, který navrhl japonský univerzitní profesor a inovátor v oblasti řízení kvality Kaoru Išikawa.



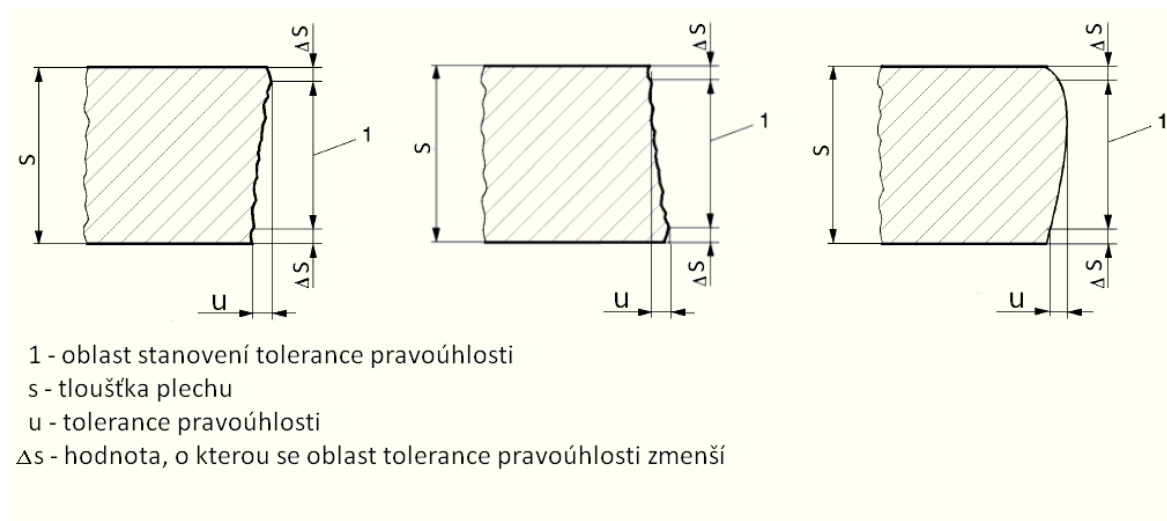
Obr.3 Diagram pro laserové řezání dle Išikawy [2]

### 3. Hodnocení kvality řezu laserem

Jako kritéria hodnocené pouhým okem můžeme brát například vydrolení materiálu, otřepy, či rýhy po řezání. Přesnějšího hodnocení lze dosáhnout pomocí zařízení pro měření drsnosti, kolmosti a šířky mezery řezné spáry. Vyhodnocení řezné plochy probíhá dle normy ČSN EN ISO 9013, která stanovuje stupně jakosti a tolerance řezů pro materiály vhodné pro řezání laserem od 0,5 mm do 40 mm.

#### 3.1 Úchylka kolmosti

Tolerance pravoúhlosti  $u$  je vzdálenost dvou rovnoběžných přímek (dotýkajících se řezného povrchu), mezi nimiž musí ležet profil řezné plochy pod teoreticky správným úhlem u svislých řezů tedy pod  $90^\circ$ . V toleranci pravoúhlosti je obsažena jak odchylka od přímkové rovnosti, tak odchylka rovinnosti. Tolerance pravoúhlosti se měří pomocí číselníkového úchylkoměru. [25]



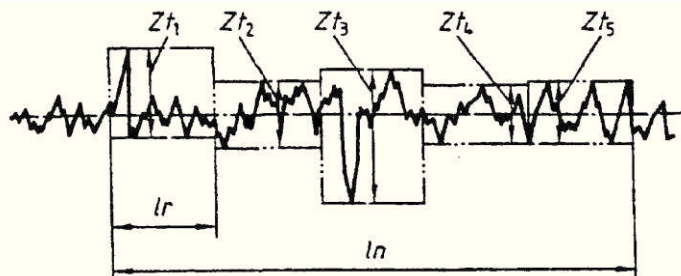
Obr.4 Měření pravoúhlosti [13]

Příliš velká odchylka tolerance v pravoúhlosti může být způsobena:[13]

- špatnou polohou ohniska
- špatným tlakem plynu
- špatnou řeznou rychlostí

### 3.2 Průměrná výška prvků profilu Rz5

Rz5 je aritmetický průměr z jednotlivých výšek prvků profilu na pěti za sebou následujících základních délkách (obr.5). [25]



kde:

$Zt_1$  až  $Zt_5$  charakterizuje jednotlivé prvky profilu;

$l_n$  je celková vyhodnocovaná délka;

$l_r$  je základní délka ( $1/5$  z  $l_n$ ).

Obr.5 Průměrná výška prvků profilu Rz5 [25]

Hloubka drsnosti řezných ploch je ovlivňována: [13]

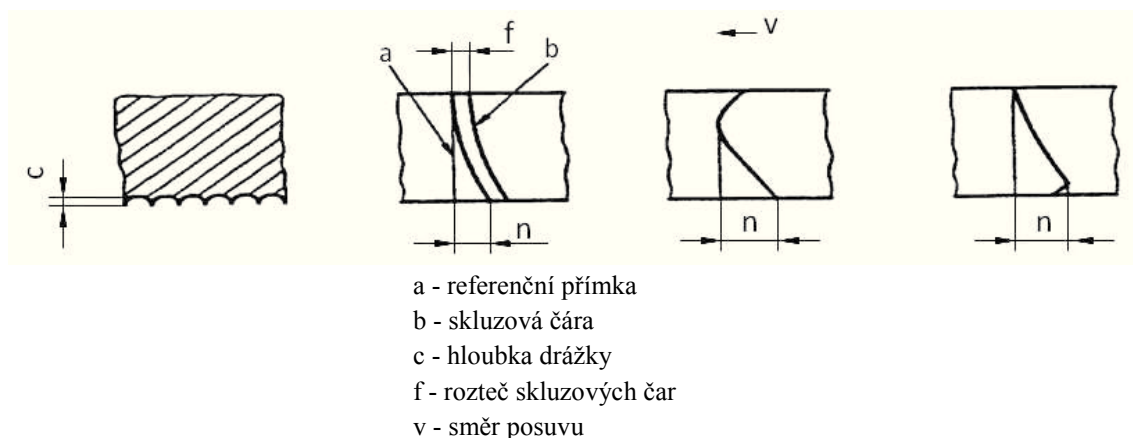
- tlakem plynu,
- řeznou rychlostí,
- výkonem laseru.

### 3.3 Skluz – “n”

Je průmět vzdálenosti mezi dvěma body skluzové čáry ve směru řezání (obr.6). Při řezání materiálu laserem vzniká na ploše řezu charakteristické rýhování. Toto zakřivení je vždy v opačném směru, než směr řezání. Se zvyšující se rychlostí se zalomení zvětšuje. Skluz posuzujeme vizuálně a označeme ho jako největší vzdálenost mezi dvěma řeznými drážkami ve směru řezání [25].

Možné příčiny velkého skluzu: [13]

- vysoká rychlost řezání,
- nízký výkon laseru,
- nízká poloha ohniska,
- nízký tlak kyslíku.



Obr.6 Schéma měření drážky řezu [25]

### 3.4 Zóna tepelně ovlivnitelné oblasti

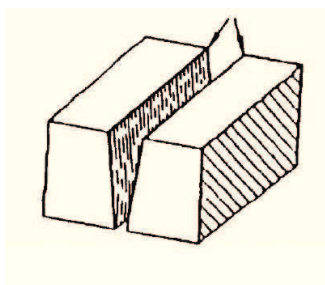
U tepelných opracování laserovým paprskem dochází k tepelnému ovlivnění materiálu. Toto tepelné působení má za následek změnu struktury materiálu, jejíž míru lze posoudit nejlépe mikroskopicky. Při dělení materiálu laserem se tloušťka tepelně ovlivněné oblasti pohybuje od 0,05 do 0,2 mm [7].

### 3.5 Vady při řezání laserem

Norma ČSN EN 12584 definuje termíny možných vad řezů provedených laserem. Tato norma je českou verzí evropské normy EN 12584:1999. Vadami jsou nepravidelnosti nebo úchytky od stanoveného tvaru a polohy řezu.

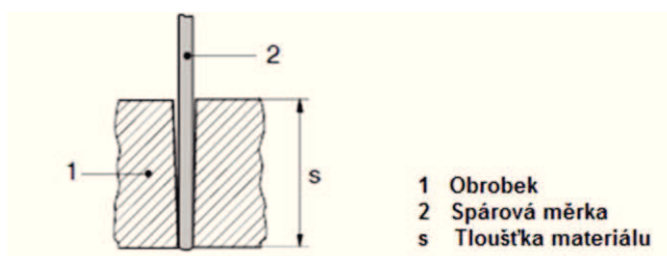
#### 3.5.1 Rozšíření řezné spáry

Řezná spára vznikající při řezání laserem se zpravidla od horní hrany řezu k dolní hraně řezu zužuje. Tento problém se objevuje u obrobků o tloušťce větší než 3 mm. Toto podřezání způsobuje, že na horní hraně obrobku naměříme menší rozměr než na hraně dolní. Velikost řezné spáry je u CO<sub>2</sub> laserů užší než u pevnolátkových laserů [23].



Obr.7 Rozšíření řezné spáry [23]

Měření řezné spáry se provádí pomocí spárových měrek, kdy zjišťujeme hloubku zanoření měrky.



Obr.8 Měření šířky řezu spárovými měrkami [13]

Příčiny příliš velkých řezných spár:[13]

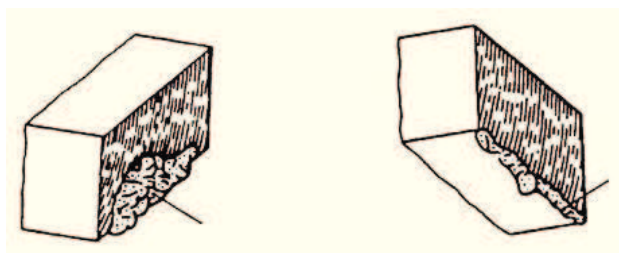
- špatná poloha ohniska,
- znečištěná čočka,
- poškozený povlak čočky,
- tepelné chování laserového paprsku v důsledku znečištěné optiky rezonátoru.

Tab.2 Velikosti řezných spár pro CO<sub>2</sub> lasery Trumpf [13]

MATERIÁL	TLOUŠŤKA PLECHU [mm]	ŠÍŘKA ŘEZNÉ SPÁRY [mm]
<b>Konstrukční ocel</b> 1.0120	1-3	0,15
	4-6	0,2-0,3
	7-15	0,35-0,4
	16-20	0,5
<b>Korozivzdorná ocel</b> 1.4301 Vysokotlaké řezání N <sub>2</sub>	1-3	0,15
	4-8	0,2
	10-12	0,5
<b>Hliníkové slitiny</b> AlMg <sub>3</sub> , AlMgSi <sub>1</sub> Vysokotlaké řezání N <sub>2</sub>	1-3	0,15
	4-8	0,2-0,3

### 3.5.2 Ulpívající struska

Při řezání mohou vznikat na opačné straně řezu ostré hrany. Posuzujeme jejich typ a velikost. Otřepy mohou mít buď přilnavou strusku, kterou lze snadno odstranit, nebo silně přilnavé kovové výčnělky, které bez následného obrábění materiálu nelze odstranit. Při řezání silnějších plechů (10-20 mm), se může ulpívající struska na obou stranách řezu spojit tzv. “zapéct” [23].



Obr.9 Ulpívající struska [23]

### Druhy otřepů: [13]

#### Kapkový otřep

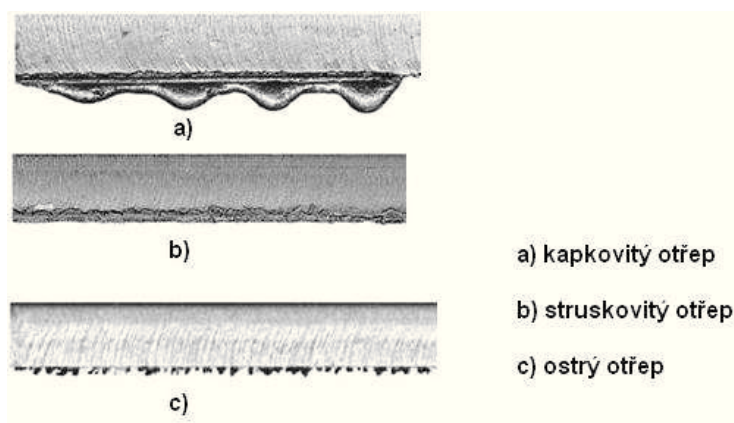
- silně přilnavý,
- kovově čistý povrch.

#### Struskovitý otřep

- méně přilnavý,
- lze snadno odstranit.

#### Ostrý otřep

- vzniká u korozivzdorných ocelí,
- je silně přilnavý,
- spodní část řezu je velmi drsná a špičatá.

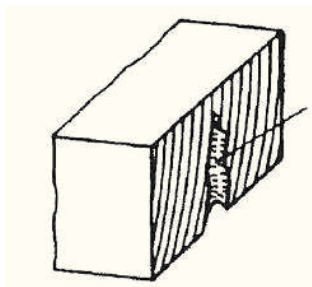


Obr.10 Druhy otřepů [13]



### 3.5.3 Zápaly (vruby)

Vytrhávání materiálu z plochy řezu do omezené hloubky ve spodní části řezu, obvykle ve směru řezání. Šířka a hloubka zápalů přesahuje šířku a hloubku řezných stop. Zápaly se mohou vyskytovat izolovaně nebo ve skupinách. Tato vada je způsobena nízkou řeznou rychlostí [23].



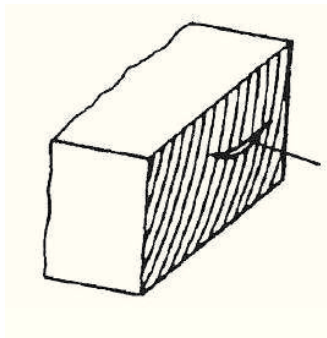
Obr.11 Izolovaný zápal [23]

### 3.5.4 Trhliny

Porušení materiálu způsobené místní trhlinou, která může vzniknout vlivem ochlazování nebo napětí [23].

**Mikrotrhlina** - trhlina pozorovatelná obvykle pouze pod mikroskopem [23].

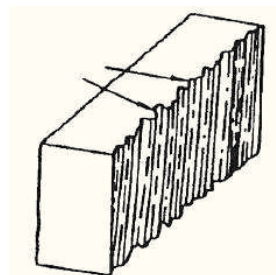
**Makrotrhlina** - trhlina pozorovatelná pouhým okem [23].



Obr.12 Makrotrhlina na ploše řezu [23]

### 3.5.5 Nepravidelná hloubka řezné stopy

Nepřípustná proměnlivost hloubky řezné stopy, která může být způsobena kolísajícím výkonem laseru [23].



Obr.13 Nepravidelná hloubka řezné stopy [23]

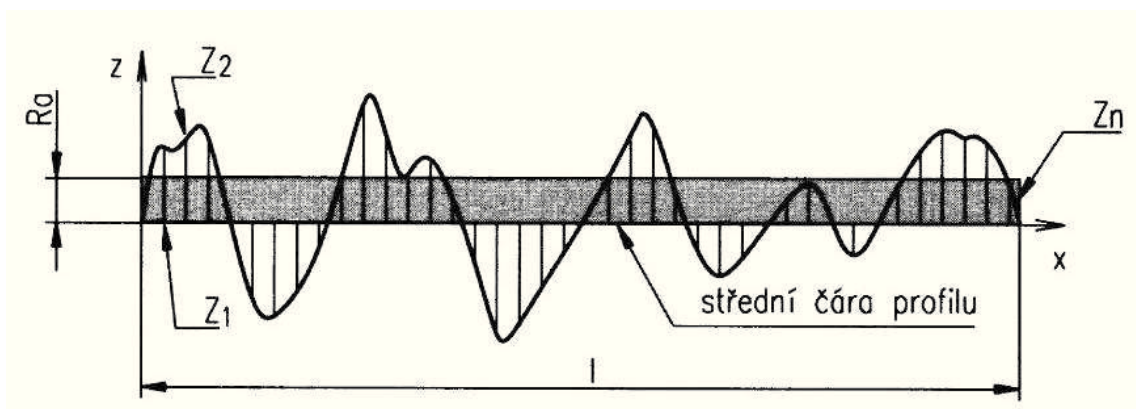
### 3.6 Parametry drsnosti povrchu

Drsnost je souhrn odchylek od ideálně rovné plochy měřeného úseku. Tyto nerovnosti jsou způsobeny vlivem výroby. Jsou ovlivněny technologií a technologickými podmínkami při výrobě. Skutečný profil daného povrchu získáváme měřením velikostí jednotlivých odchylek od průsečnice s kolmou nebo šikmou rovinou.

Stupeň drsnosti obrobené plochy se určuje buď porovnáním dle vzorových etalonů, nebo změřením některých parametrů udávajících charakteristiku drsnosti povrchu. Tyto parametry uvádí norma ČSN EN ISO 4287. V praxi se drsnost nejčastěji posuzuje podle průměrné aritmetické úchylky  $R_a$  a největší výšky profilu  $R_z$ .

#### a) Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu $R_a$ : [24]

Je aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic  $Z(x)$  v rozsahu základní délky.



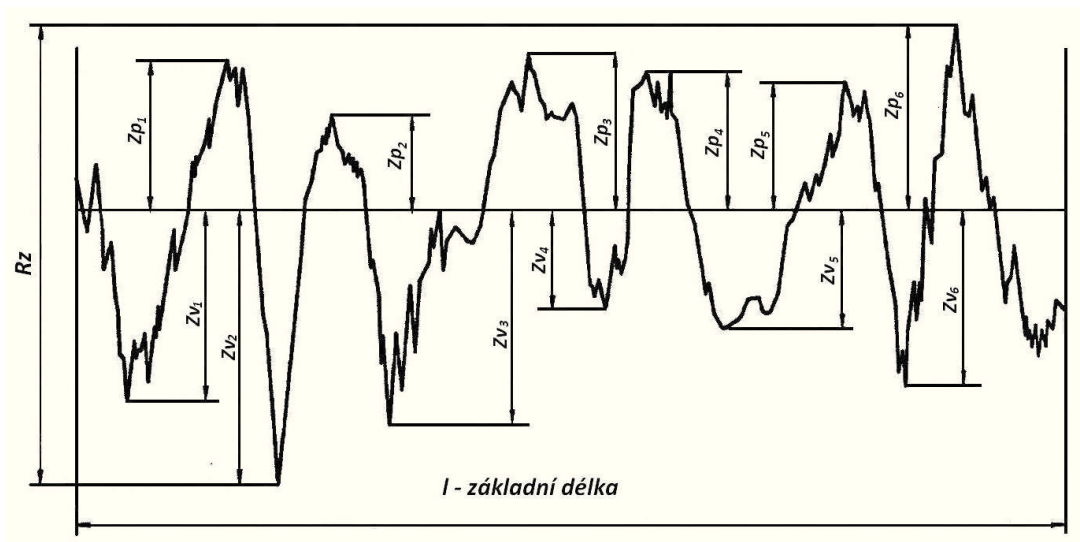
Obr.14 Průměrná aritmetická úchylka  $R_a$  [3]

Vzorec pro výpočet parametru  $R_a$ : [4], [24]

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (1)$$

**b) Největší výška profilu  $R_z$ : [24]**

Je součet výšky  $Z_p$  nejvyššího výstupku profilu a hloubky  $Z_v$  nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky.



Obr.15 Největší výška profilu  $R_z$  [24]

Vzorec pro výpočet parametru  $R_z$ :

$$R_z = Zp_{max} + Zv_{max} \quad (2)$$

## 4. Návrh experimentu

Hlavním úkolem tohoto experimentu je vyhodnocení kvality řezů v závislosti na různých řezných parametrech. Dále nalezení nejvhodnějších řezných parametrů a porovnání kvality řezu prováděného na pevnolátkovém laseru a CO<sub>2</sub> laseru. Pro realizaci experimentu byl použit zkušební materiál EN AW 5754H22 [AlMg3] o tloušťce 3 mm, laserové obráběcí stroje Trumpf TC L3050 a TruLaser 5030 fiber.

### 4.1 Zkušební materiál

EN AW 5754H22 [ČSN 424413; AlMg3] - slitina hliníku tvářená pro všeobecné účely. Pro plechy, pásy, pruhy, kotouče za studena válcované, tyče (kruhové, ploché, čtvercové, šestihranné) lisované za tepla a tažené za studena, trubky kruhové tažené za studena. Odolnost proti korozi velmi dobrá, větší odolnost vůči mořské vodě a slabě alkalickým roztokům než u technicky čistého hliníku. Střední pevnost, velmi dobrá tváritelnost při lisování za tepla a leštitelnost. Dobrá obrobitelnost. Velmi dobrá svařitelnost běžnými technologiemi, nutný předhřev na 100 - 300 °C, podle tloušťky materiálu.

Použití pro potravinářský a chemický průmysl, vnitřní a vnější architekturu, stavbu vozidel a plavidel (nosné konstrukce, výměníky tepla, ochranné kryty, součásti zemědělských, textilních a zpracovatelských strojů) [16].

Tab.3 Chemické složení

Fe %	Si %	Cu %	Mg %	Mn %	Cr %	Ti %	Zn %	Ni %	Ga %	V %	Al%
0,34	0,09	0,018	2,82	0,095	0,027	0,013	0,042	0,006	0,01	0,017	96,522

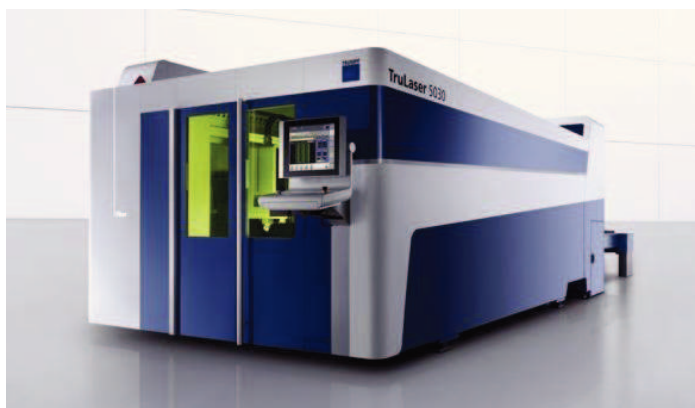
Tab.4 Mechanické vlastnosti

Rm [MPa]	Rp0,2 [MPa]	A50 %
224	168	19

## 4.2 Použité stroje a přístroje

### 4.2.1 Trumpf TruLaser 5030 fiber

TruLaser 5030 fiber je 2D laserový řezací stroj firmy Trumpf, který disponuje pracovním prostorem 3000x1500 mm a výkonem 5 kW. Tento pevnolátkový diskový laser najde uplatnění především v oblasti tenkých plechů, kdy je oproti plynovému CO<sub>2</sub> laseru rychlejší u plechů do tloušťek okolo 4 mm. Výhodou tohoto laseru může být možnost řezání za podpory stlačeného vzduchu a dále možnost řezání mosazi a mědi [22].



Obr.16 TruLaser 5030 fiber [22]

Tab.5 Technické parametry stroje TruLaser 5030 fiber [22]

Technické parametry	
Max.výkon laseru	5000 W
Vlnová délka	1,03 $\mu\text{m}$
Pracovní rozsah	
Osa X	3000 mm
Osa Y	1500 mm
Osa Z	115 mm
Max. tloušťka materiálu	
Konstrukční ocel	20 mm
Ušlechtilá ocel	15 mm
Hliník	15 mm
Měď	6 mm
Mosaz	6 mm
Max. souběžná rychlost os	235 m/min
Rozměry stroje	
Délka	9400 mm
Šířka	3000 mm
Výška	2400 mm
Hmotnost	12700 kg

#### 4.2.2 Trumpf TC L3050

Opět se jedná o 2D laserový řezací stroj, tentokrát se však jde o plynový CO<sub>2</sub> laser s pracovním prostorem 3000x1500 mm a výkonem 5 kW.



Obr.17 TC L3050 [19]

Tab.6 Technické parametry stroje TC L3050 [5]

Technické parametry	
Max.výkon laseru	5000 W
Vlnová délka	10,6 $\mu$ m
Pracovní rozsah	
Osa X	3000 mm
Osa Y	1500 mm
Osa Z	100 mm
Max. tloušťka materiálu	
Konstrukční ocel	25 mm
Ušlechtilá ocel	20 mm
Hliník	12 mm
Max. rychlosti os	
Rychlost polohování x/y	200 m/min
Simultánní rychlost polohování	300 m/min
Rozměry stroje	
Délka	11100 mm
Šířka	4600 mm
Výška	2400 mm
Hmotnost	12000 kg

### 4.2.3 Drsnoměr Mitutoyo Surftest SJ - 301

Měření drsnosti vzorků bylo provedeno prostřednictvím přenosného drsnoměru s vestavěnou tiskárnou pro měření kontaktním způsobem. Drsnoměr je vybaven velkým LCD displejem pro snadnější odečítání naměřených hodnot a vypočítaných křivek. Pomocí vestavěné tiskárny lze okamžitě vytisknout výsledky měření. Surftest SJ-301 ukládá do paměti až 5 různých podmínek měření. Naměřené hodnoty lze stáhnout do PC. Odpovídá mezinárodním normám DIN, ISO, ANSI a JIS [11].



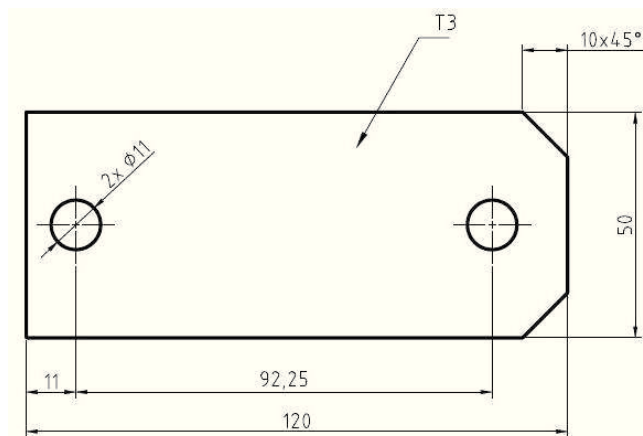
Obr.18 Mitutoyo Surftest SJ-301 [15]

Tab.7 Technické parametry drsnoměru Surftest SJ-301 [11]

Technické parametry	
Rychlost měření	0,25-0,5 mm/s
Rozsah měření	350 $\mu\text{m}$
Poloměr hrotu	2 $\mu\text{m}$
Měřené parametry	Ra, Ry, Rz, Rp, Rq, Rv, Sm, S, Pc, R3z, mr, Rpk, Rvk, $\delta c$ , Rk, Mr 1, Mr 2, Lo, Ppi, R, AR, Rx, A1, A2
Rozhraní pro připojení PC	RS232

### 4.3 Volba zkušebního vzorku

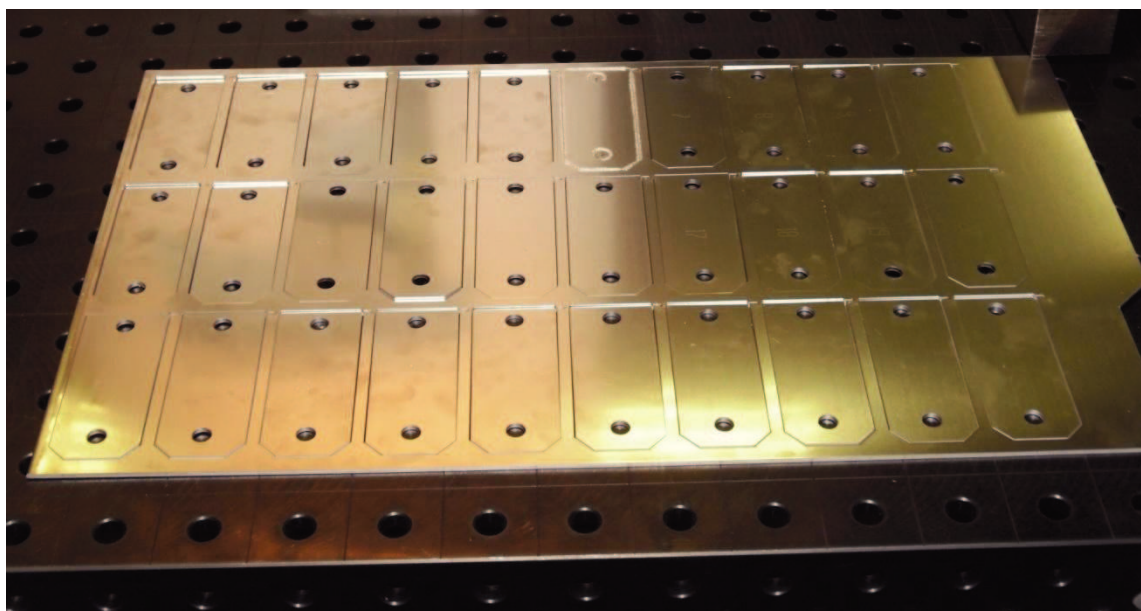
Pro experiment bylo třeba velké množství vzorků, tudíž byl pro úsporu materiálu zvolen ne příliš velký dílec. Byla vybrána součást, kterou běžně zákazník poptává. Tloušťka materiálu 3 mm se také odráží od zákaznickových požadavků, jelikož tvoří pravidelně největší podíl zakázky. Součást má rovnou plochu s otvorem pro snadnou kontrolu kvality a bezproblémové měření drsnosti.



Obr.19 Experimentální vzorek

#### 4.4 Návrh metodiky experimentu

Pro zjištění toho, jaký vliv mají řezné parametry na výsledný řez, bylo vytvořeno 30 vzorků. Tento pokus probíhal na stroji TruLaser 5030 fiber. Dále bylo vytvořeno 7 vzorků na CO<sub>2</sub> laseru z důvodu porovnání těchto dvou technologií. Doposud se ve firmě MRB s.r.o. pro hliníkové dílce o této tloušťce upřednostňoval CO<sub>2</sub> laser, z důvodu kratšího výrobního času. Úkolem bylo, zda najdeme vhodné parametry s uspokojivou kvalitou a zároveň s vyšší rychlostí řezu, než u CO<sub>2</sub> laseru.

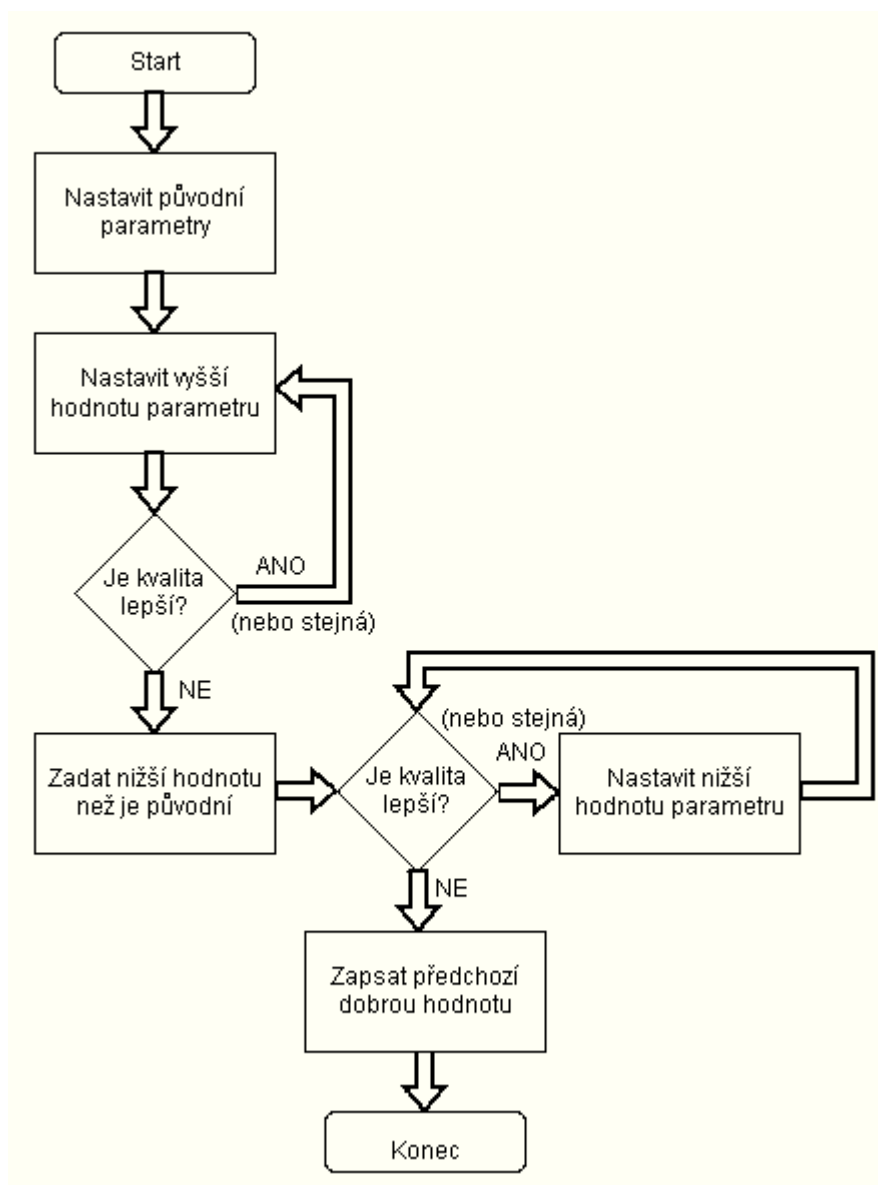


Obr.20 Výpalek se zkušebními vzorky

Pro samotný pokus byl vytvořen program o 35 kusech, kdy byl každý kus označen vygravírovaným číslem. Na stroji byla využita funkce „zastavit po kuse“, tudíž byl vytvořen pouze jeden program a jednotlivé parametry se měnily po každém kuse. První vzorek byl vytvořen při standartních parametrech, které byly na stroji vyladěny pro daný materiál. Tyto parametry se od doporučených parametrů výrobcem lišily, nicméně i při



těchto parametrech byl vzorek vytvořen. Samotné vzorkování je uvedeno na obr.21, kdy byl postup zobrazený na diagramu použit pro každý parametr. Výsledné hodnoty byly zapsány. Tyto hodnoty byly použity jako výchozí v druhé fázi vzorkování, kdy byly nastaveny místo původních hodnot a postup se opakoval s rozdílem jemnějšího ladění.



Obr.21 Diagram postupu vzorkování

Tab.8 Nastavené řezné parametry na stroji TruLaser 5030 fiber

<b>Parametr</b> <b>číslo vzorku</b>	<b>výkon laseru [W]</b>	<b>řezná rychlost [m/min]</b>	<b>fokusace [mm]</b>	<b>tlak plynu [bar]</b>	<b>pulzní frekvence [Hz]</b>	<b>vzdálenost trysky [mm]</b>
č.1	<b>5000</b>	4	3,5	10	20000	3
č.2	<b>4000</b>	4	3,5	10	20000	3
č.3	<b>3555</b>	4	3,5	10	20000	3
č.4	5000	<b>3</b>	3,5	10	20000	3
č.5	5000	<b>5</b>	3,5	10	20000	3
č.6	5000	<b>7</b>	3,5	10	20000	3
č.7	5000	<b>10</b>	3,5	10	20000	3
č.8	5000	4	<b>3</b>	10	20000	3
č.9	5000	4	<b>2,5</b>	10	20000	3
č.10	5000	4	<b>4</b>	10	20000	3
č.11	5000	4	<b>4,5</b>	10	20000	3
č.12	5000	4	3,5	<b>5</b>	20000	3
č.13	5000	4	3,5	<b>14</b>	20000	3
č.14	5000	4	3,5	<b>12</b>	20000	3
č.15	5000	4	3,5	<b>8</b>	20000	3
č.16	5000	4	3,5	<b>11</b>	20000	3
č.17	5000	4	3,5	<b>9</b>	20000	3
* č.18	5000	<b>7,5</b>	<b>2,5</b>	<b>12</b>	20000	3
č.19	5000	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>11</b>	20000	3
č.20	5000	5	3	<b>9</b>	20000	3
č.21	5000	5	<b>3,5</b>	9	20000	3
č.22	5000	<b>4,5</b>	3,5	9	20000	3
č.23	5000	4,5	<b>4</b>	9	20000	3
** č.24	5000	4,5	4	9	20000	3
č.25	5000	<b>5</b>	<b>3,5</b>	<b>10</b>	20000	3
č.26	5000	5	3,5	10	<b>10000</b>	3
č.27	5000	5	3,5	10	<b>5000</b>	3
č.28	5000	5	3,5	10	<b>30000</b>	3
č.29	5000	5	3,5	10	20000	<b>2</b>
č.30	5000	5	3,5	10	20000	<b>4</b>

\* parametry doporučené výrobcem stroje

\*\* použita funkce „bez zpomalování“ (celý obvod vzorku stejnou rychlostí)

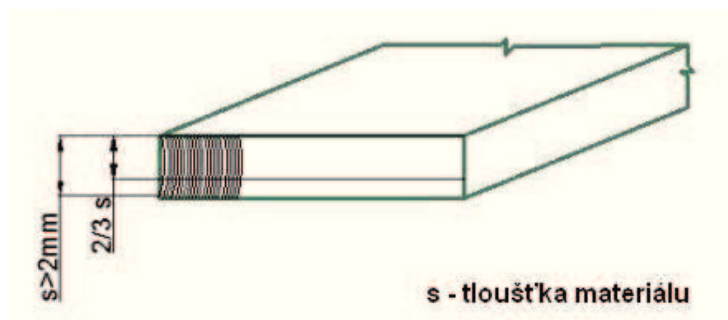
Tab.9 Nastavené řezné parametry na stroji TC L 3050

<b>Parametr</b> <b>číslo</b> <b>vzorku</b>	<b>výkon</b> <b>laseru</b> <b>[W]</b>	<b>řezná</b> <b>rychlost</b> <b>[m/min]</b>	<b>fokusace</b> <b>[mm]</b>	<b>tlak</b> <b>plynu</b> <b>[bar]</b>
č.31	5000	<b>5,5</b>	-2,5	13,5
č.32	5000	<b>6,5</b>	-2,5	13,5
č.33	5000	<b>4,5</b>	-2,5	<b>13,5</b>
č.34	5000	5,5	-2,5	<b>10</b>
č.35	5000	5,5	<b>-2,5</b>	<b>17</b>
č.36	5000	5,5	<b>-2</b>	13,5
č.37	5000	5,5	<b>-3</b>	13,5

## 5. Hodnocení výsledné kvality řezů

### 5.1 Měření drsnosti

Pro samotné měření byl zvolen parametr  $R_a$  z důvodu, že tento parametr drsnosti povrchu se na výkresech zákazníka objevuje nejčastěji. Drsnosti se po laserovém řezání měří v místě maximální drsnosti povrchu. Měření bylo provedeno vždy 10 krát dle normy (DIN 2310) ve  $2/3$  hloubky od místa vstupu paprsku ve směru řezu u každého vzorku. Pro výsledky byl proveden test odlehlých hodnot, které byly vyloučeny a následně spočítán aritmetický průměr a směrodatná odchylka.



Obr.22 Měření drsnosti řezné plochy [7]

Měření bylo provedeno pomocí drsnoměru Mitutoyo Surftest SJ-301.

Tab.10 Nastavené parametry drsnoměru SJ-301

Nastavené parametry pro měření	
Základní délka $\lambda_c$	0,8 mm
Vyhodnocovaná délka $5 \times \lambda_c$	4 mm
Profil	R
Filtr	Gaussův
Vyhodnocení	$R_a$

Tab.11 Výsledky měření drsnosti povrchů vzorků řezaných na stroji TruLaser 5030 fiber.

Měření [Ra] číslo vzorku	M1 [μm]	M2 [μm]	M3 [μm]	M4 [μm]	M5 [μm]	M6 [μm]	M7 [μm]	M8 [μm]	M9 [μm]	M10 [μm]	Aritmet. průměr	Směrodatná odchylka
č.1	3,85	4,06	4,39	4,01	3,91	4,19	3,98	3,9	4,08	3,89	<b>4,03</b>	<b>0,16</b>
č.2	3,01	3,26	2,18	3,18	3,26	3,56	2,85	2,27	2,54	2,31	<b>2,84</b>	<b>0,49</b>
č.3	2,85	2,97	3,25	3,03	2,74	3,31	2,95	2,78	3,19	3,01	<b>3,01</b>	<b>0,19</b>
č.4	2,86	2,91	2,71	3,25	2,87	2,82	3,20	2,91	*3,6	2,77	<b>2,92</b>	<b>0,18</b>
č.5	3,81	4,16	3,77	3,65	3,95	4,03	3,70	3,75	3,91	3,86	<b>3,86</b>	<b>0,16</b>
č.6	1,75	1,95	2,15	2,06	2,22	1,81	1,95	1,98	2,02	1,82	<b>1,97</b>	<b>0,15</b>
** č.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
č.8	3,21	3,35	3,65	3,08	3,35	3,71	3,15	3,22	3,11	3,53	<b>3,34</b>	<b>0,23</b>
č.9	3,33	3,71	3,69	3,37	3,65	3,82	3,5	3,98	3,73	4,02	<b>3,68</b>	<b>0,23</b>
č.10	3,38	3,58	4,12	3,61	3,72	4,03	4,39	3,85	3,58	3,47	<b>3,77</b>	<b>0,32</b>
č.11	1,99	1,86	1,95	2,34	2,15	1,81	1,93	2,05	2,00	2,13	<b>2,02</b>	<b>0,16</b>
č.12	3,43	3,88	4,14	3,76	3,87	4,25	4,01	3,9	3,84	3,96	<b>3,90</b>	<b>0,22</b>
č.13	2,88	2,81	2,41	2,76	2,58	2,77	2,69	2,47	2,61	2,72	<b>2,67</b>	<b>0,15</b>
č.14	3,14	3,51	3,78	3,63	3,72	3,95	3,41	3,85	3,61	3,55	<b>3,62</b>	<b>0,23</b>
č.15	3,85	4,15	3,96	4,33	3,99	3,89	3,99	4,01	4,93	3,91	<b>4,10</b>	<b>0,32</b>
č.16	3,74	3,26	3,18	3,37	2,86	2,98	3,15	3,39	3,01	3,12	<b>3,20</b>	<b>0,25</b>
č.17	3,15	3,45	3,18	3,4	3,02	3,27	3,22	3,48	3,11	3,07	<b>3,24</b>	<b>0,16</b>
č.18	2,81	2,55	2,42	2,61	2,18	2,71	2,48	2,53	2,96	2,57	<b>2,58</b>	<b>0,22</b>
č.19	5,19	5,88	5,33	5,45	5,12	4,85	4,91	5,01	4,55	5,23	<b>5,15</b>	<b>0,36</b>
č.20	4,01	4,65	4,21	4,19	4,72	4,53	4,39	4,21	4,43	4,51	<b>4,39</b>	<b>0,23</b>
č.21	4,12	4,00	4,65	4,21	3,95	4,12	4,32	3,99	4,58	4,17	<b>4,21</b>	<b>0,24</b>
č.22	2,62	2,55	2,78	2,65	3,05	3,16	3,12	2,84	2,79	2,67	<b>2,82</b>	<b>0,22</b>
č.23	1,42	1,30	1,28	1,66	1,53	1,65	1,78	1,64	1,36	1,45	<b>1,51</b>	<b>0,17</b>
č.24	2,05	1,91	1,87	1,77	1,55	1,81	1,92	1,63	1,53	1,82	<b>1,79</b>	<b>0,17</b>
č.25	3,85	4,19	4,02	4,12	3,98	4,38	4,41	4,24	4,38	4,31	<b>4,19</b>	<b>0,19</b>
č.26	4,83	5,1	4,71	4,88	4,91	5,05	4,41	4,3	4,94	5,01	<b>4,81</b>	<b>0,27</b>
č.27	3,06	3,28	3,51	3,11	3,31	3,43	3,16	3,10	3,22	3,15	<b>3,23</b>	<b>0,15</b>
č.28	3,16	3,74	3,21	3,64	3,31	3,64	3,71	3,51	3,8	2,94	<b>3,47</b>	<b>0,29</b>
č.29	3,70	3,64	3,77	3,71	3,35	3,48	3,91	3,85	3,94	3,85	<b>3,72</b>	<b>0,19</b>
č.30	1,98	1,77	1,82	1,62	1,91	1,48	1,65	1,78	1,82	1,89	<b>1,77</b>	<b>0,15</b>

\* odlehlá hodnota, která byla z výpočtu vyřazena

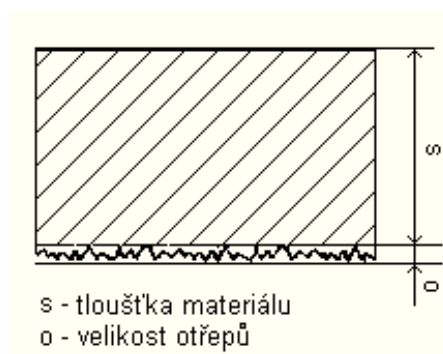
\*\* u vzorku č.7 nebyly naměřeny hodnoty z důvodu zapečení dílce do plechu

Tab.12 Výsledky měření drsnosti povrchů vzorků řezaných na stroji TC L 3050

Měření [Ra] číslo měření	M1 [μm]	M2 [μm]	M3 [μm]	M4 [μm]	M5 [μm]	M6 [μm]	M7 [μm]	M8 [μm]	M9 [μm]	M10 [μm]	Aritmet. průměr	Směrodatná odchylka
č.31	2,12	2,23	2,31	2,05	2,45	2,31	2,48	2,26	2,38	2,42	2,3	0,14
č.32	2,32	1,98	2,21	2,12	1,95	2,17	2,34	2,05	2,15	1,99	2,13	0,14
č.33	2,77	2,82	2,92	2,84	2,48	2,62	2,91	2,86	2,72	2,98	2,79	0,15
č.34	2,15	1,65	1,84	1,98	2,02	1,78	1,59	2,00	2,12	2,05	1,92	0,19
č.35	3,12	3,48	3,42	3,31	3,65	3,28	3,70	3,41	3,51	3,67	3,46	0,19
č.36	2,61	3,12	3,21	3,05	2,98	2,89	3,1	2,99	3,28	3,06	3,03	0,19
č.37	2,81	2,52	2,50	2,12	2,21	2,71	2,31	2,05	2,45	2,18	2,39	0,25

## 5.2 Měření velikosti otřepů

Dalším kritériem pro hodnocení laserového řezu je výskyt a velikost otřepů. K měření bylo použito digitální posuvné měřítko o měřicím rozsahu 0-150 mm s rozlišitelností 0,01 mm.



Obr.23 Velikost otřepů [7]

Tab.13 Velikosti otřepů vzorků č. 1-10 řezaných na stroji TruLaser 5030 fiber

Vzorek č.	č.1	č.2	č.3	č.4	č.5	č.6	č.7	č.8	č.9	č.10
Velikost otřepu [mm]	0,05	0,25	0,45	0,10	0,05	0,05	-	0,05	0,04	0,07

Tab.14 Velikosti otřepů vzorků č. 11-20 řezaných na stroji TruLaser 5030 fiber

Vzorek č.	č.11	č.12	č.13	č.14	č.15	č.16	č.17	č.18	č.19	č.20
Velikost otřepu [mm]	0,08	0	0,05	0,05	0,10	0,05	0,10	0,05	0,04	0,03

Tab.15 Velikosti otřepů vzorků č. 21-30 řezaných na stroji TruLaser 5030 fiber

Vzorek č.	č.21	č.22	č.23	č.24	č.25	č.26	č.27	č.28	č.29	č.30
Velikost otřepu [mm]	0,04	0,05	0,05	0,05	0,07	0,06	0,06	0,07	0,08	0,06

Tab.16 Velikosti otřepů vzorků č. 31-37 řezaných na stroji TC L 3050

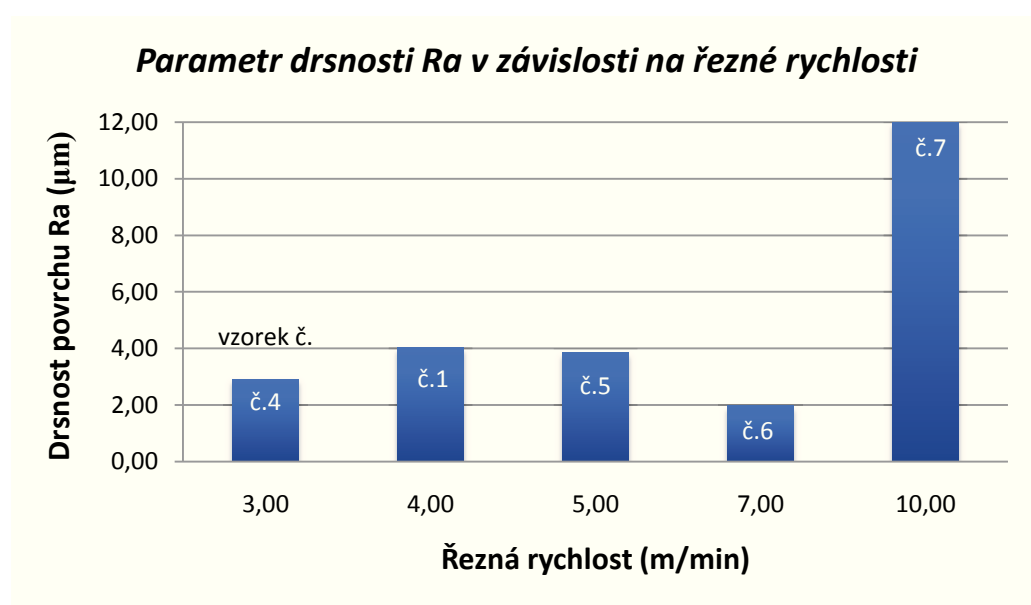
Vzorek č.	č.31	č.32	č.33	č.34	č.35	č.36	č.37
Velikost otřepu [mm]	0,08	0,13	0,53	0,05	0,55	0,2	0,08

## 6. Zhodnocení výsledků experimentu

Vizuální kontrolou, měřením velikosti natavené strusky a měřením parametru drsnosti povrchu Ra byly zjištěny závislosti, které zásadním způsobem ovlivňují kvalitu výsledného řezu na stroji TruLaser 5030 fiber. Byla nalezena vhodná kvalita řezu, přičemž byla během experimentu vyřešena i problematická místa v oblasti zkosení a hran. Řezná hlava zde zpomalovala, tudíž zde vznikala vyšší teplota a hliníkový materiál se taval. Toto zpomalování bylo vypnuto, čímž se vyřešil problém s upalováním rožků.

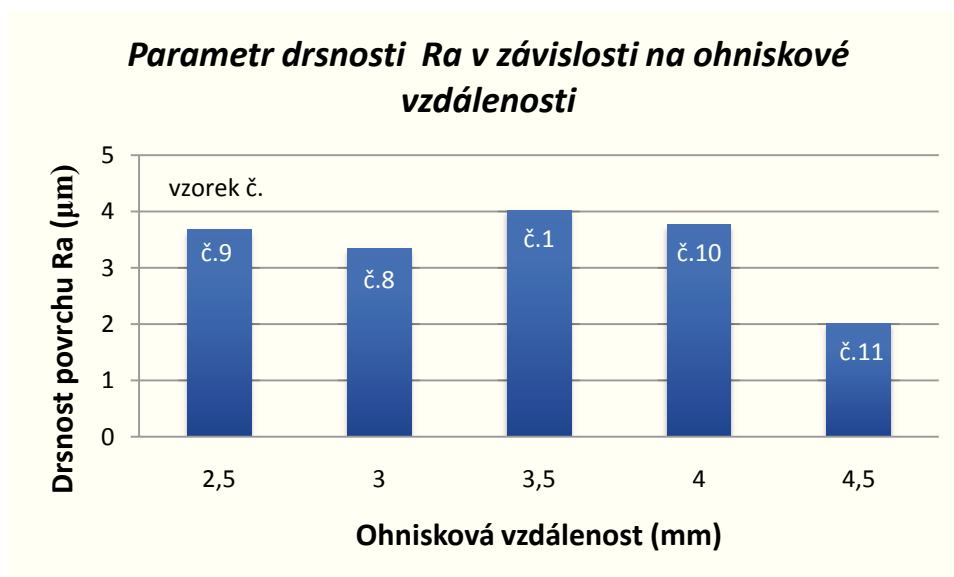
### 6.1 Závislost drsnosti Ra na řezných parametrech

Pro zjištění závislosti drsnosti povrchu Ra na zvolených parametrech byly vytvořeny tři grafy, přičemž byly hodnoceny závislosti na řezné rychlosti, ohniskové vzdálenosti a tlaku plynu. Tyto parametry ovlivňovaly výslednou kvalitu nejvíce a byly nejčastěji měněny. Pro každou závislost byly vybrány vzorky, u kterých se měnil pouze zkoumaný parametr a ostatní zůstaly konstantní.



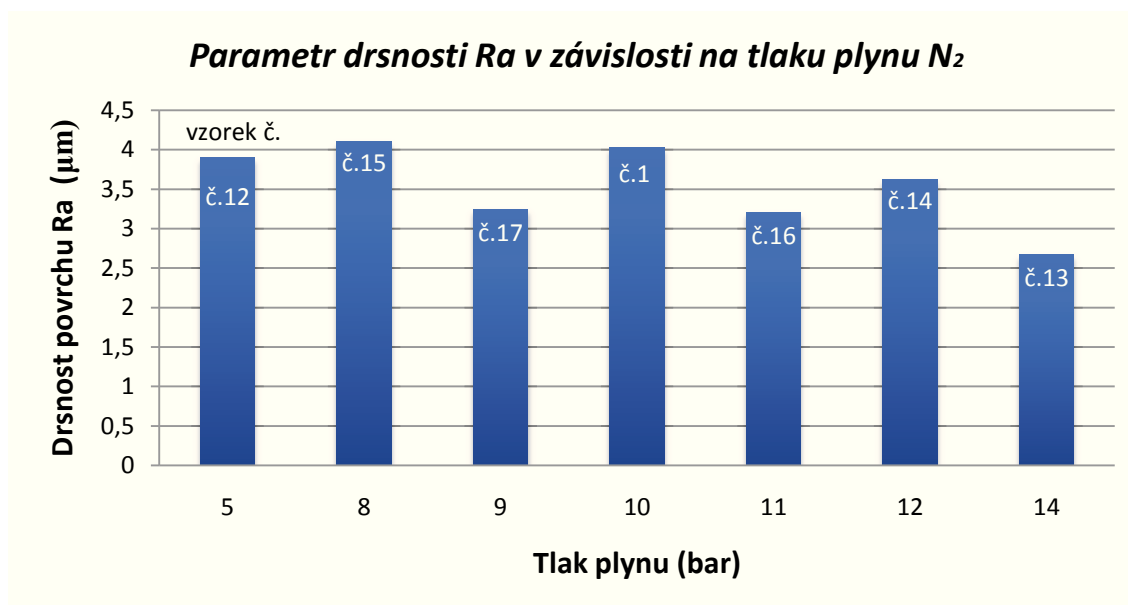
Obr.24 Závislost drsnosti Ra na řezné rychlosti

Při hodnocení vlivu řezné rychlosti na výslednou kvalitu řezu bylo zjištěno, že příliš vysoká rychlost neumožňuje daný materiál prořezat. Nejlepší kvality bylo dosaženo při rychlosti 7 m/min, přičemž rychlost 10m/min byla již nepřijatelná. Z grafu na obr. 24 vyplývá, že se zvyšující se řeznou rychlostí klesá hodnota drsnosti povrchu až do kritické hodnoty, která se nachází mezi rychlostmi 7 - 10m/min.



Obr.25 Závislost drsnosti Ra na ohniskové vzdálenosti

U závislosti na ohniskové vzdálenosti se drsnost povrchu Ra pohybovala od 3,34 μm do 4,03 μm až do hodnoty ohniskové vzdálenosti 4,5 mm, kdy se kvalita řezu výrazným způsobem zlepšila. Pro kompletní závislost nebyly vytvořeny další vzorky. Z tohoto důvodu nebyla potvrzena hypotéza, že s dalším zvětšováním ohniskové vzdálenosti drsnost povrchu klesá, až do hodnoty, kdy se kvalita řezu začne znovu zhoršovat.



Obr.26 Závislost drsnosti Ra na tlaku plynu N<sub>2</sub>

Z výsledků na obr. 26 se potvrdil předpoklad, že pro daný materiál se zvyšujícím se tlakem plynu hodnota drsnosti povrchu klesá.



## 6.2 Nalezení nejvhodnějších vzorků

Pro zvolení nejvhodnějších řezných parametrů jsme hledali vzorky, u nichž bylo dosaženo nejmenších hodnot drsnosti Ra a ne příliš velkých otřepů. Rozhodujícím kritériem jsme zvolili řeznou rychlost, při níž byly vzorky vyrobeny.

Jako nejvhodnější vzorky byly zvoleny vzorek č.6 a vzorek č.32.

Tab.17 Nejvhodnější vzorky řezané na stroji TruLaser 5030 fiber

Číslo vzorku	Drsnost povrchu Ra [μm]	Velikost otřepu [mm]	Řezná rychlost [m/min]
č. 6	1,97	0,05	7
č. 11	2,02	0,08	4
č. 23	1,51	0,05	4,5
č. 24	1,79	0,05	4,5
č. 30	1,77	0,06	5

Tab.18 Nejvhodnější vzorky řezané na stroji TC L 3050

Číslo vzorku	Drsnost povrchu Ra [μm]	Velikost otřepu [mm]	Řezná rychlost [m/min]
č. 32	2,13	0,13	6,5
č. 34	1,92	0,05	5,5

Experiment dokázal, že při vhodném nastavení řezných parametrů lze dosáhnout velmi kvalitního řezu. Dosažené výsledky z pevnolátkového laseru TruLaser 5030 fiber a CO<sub>2</sub> laseru TC L 3050 byly velmi podobné, což znamená, že pro daný výrobek jsou vhodné obě technologie. U pevnolátkového laseru byla dosažena dokonce vyšší rychlost, tudíž upřednostnění CO<sub>2</sub> laseru ve firmě MRB Sazovice s.r.o. pro výrobky z tohoto materiálu je neopodstatněné a předpokládaná hypotéza se potvrdila. Při pokusech bylo dokonce zjištěno, že u stroje TruLaser 5030 fiber byly nastavené parametry v softwaru pro vytváření programů rozdílné s těmi ve stroji, což způsobilo nesprávný výpočet pracovní doby programu, který programátor zohledňoval při výběru stroje.

## Závěr

Bakalářská práce byla zaměřena na vliv řezných parametrů při dělení materiálu laserem. Tato nekonvenční technologie se v poslední době začíná čím dál více uplatňovat a zdokonalovat. Důvodem jsou především takové parametry výrobků, které dosavadními technologiemi nebylo možno dosáhnout. Negativními aspekty však jsou vysoká pořizovací cena a maximální tloušťka materiálu, kterou lze laserem řezat. Použití laserové technologie pro dělení materiálu laserem je vhodné zvláště pro kusovou a malosériovou výrobu.

Práce ukazuje současný stav laserového řezání, popisuje základní vlastnosti laseru a druhy řezného procesu. Dále se zabývá jednotlivými řeznými parametry laseru, hodnocením řezu a jeho vadami zahrnutými v normě ČSN EN 12584.

Experiment byl proveden ve spolupráci s firmou MRB Sazovice s.r.o., která poskytla zkušební materiál EN AW 5754H22 [AlMg3] a umožnila výrobu vzorků na pevnolátkovém laseru TruLaser 5030 fiber a CO<sub>2</sub> laseru TC L 3050 značky Trumpf. Hlavním cílem bylo nalezení nejvhodnějších řezných parametrů ovlivňujících kvalitu řezné plochy. Bylo vytvořeno 37 kusů zkušebních vzorků, které byly následně podrobněji zkoumány. Jako hodnotící parametry kvality řezné plochy byl zvolen výskyt otřepů a parametr drsnosti Ra zahrnut v normě ČSN EN ISO 4287, který se ve firmě MRB Sazovice s.r.o. na výkresech objevuje nejčastěji. Měření drsnosti Ra bylo provedeno na drsnoměru Mitutoyo SurfTest SJ-301. Na základě zjištěných údajů bylo vytvořeno doporučení pro praktickou realizaci. Během experimentu bylo také zjištěno, že u stroje TruLaser 5030 fiber byly nastavené parametry v softwaru pro vytváření programů rozdílné s těmi ve stroji, což způsobilo nesprávný výpočet strojního času, který programátor zohledňoval při výběru stroje. Závěrem bylo zjištěno, že řezání laserem je proces velmi citlivý na mnoho řezných parametrů, a při vhodném nastavení těchto parametrů lze dosahovat výsledků splňujících světové normy a náročné požadavky zákazníka.

## Seznam použité literatury

- [1] GAVRILOV, P.; JELÍNKOVÁ, H.; VRBOVÁ, M. *Úvod do laserové techniky*. 1. Vyd. Praha: ČVUT, 1994, 235 s. Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská. ISBN 80-01-01108-9.
- [2] FIALA, A. *Statistické řízení jakosti: Prostředky a nástroje pro řízení a zlepšování procesů*. Brno: Vysoké učení technické, 1997. 93 s. ISBN 80-214-0895-2.
- [3] KLETEČKA, Jaroslav a Petr FOŘT. *Technické kreslení*. 2. opr. vyd. Brno: Computer Press, 2007, 252 s. ISBN 978-80-251-1887-0.
- [4] TICHÁ, Š. *Strojírenská metrologie – část 1*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008. 112 s. ISBN 978-80-248-0671-6.
- [5] TRUMPF Praha, spol. s r. o. Praha. *Návod k provozu TC L 3050*, 4/2002. 518 s.
- [6] NOVÁK, M. *Průmyslové lasery – 1. díl*, MM Průmyslové spektrum 2012, č.3, s. 52-53. ISSN 1212-2572.
- [7] JANÍČKOVÁ, Petra. *Nekonvenční technologie obrábění – Laser* [online]. Střední odborová škola technická, Uherské Hradiště, 2010. 32 s. [cit. 2013-03-29]. Dostupné z WWW: <<http://www.uh.cz/szesgsm/files/sblizovani/pdf/laser-projekt-sablona.pdf>>.
- [8] BERKMANN, J. *Facts about. Laser technology*. [online]. Linde Gas LLC. 2006, [cit. 2014-05-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.laserdeal.com/techInfoFiles/Facts%20about%20Laser%20Cutting%20engl%5B1%5D.%20Drucklayout%2023.06.03.pdf>>.
- [9] KOŘÁŇ, P. *Laserové řezání* [online]. 2011, [cit. 2014-04-11]. Dostupný na WWW: <<http://www.lao.cz/aktualne/clanky-a-zpravy/serial-o-laserech/serial-laserove-rezani.htm>> .
- [10] *Laserové a plazmové řezání* [online]. 2009 [cit. 2014-05-12]. Dostupné z WWW: <<http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/16-17-83-84.pdf>>.
- [11] MITUTOYO. *Surface and Contour Measurement. Surftest SJ-301*. [online]. 2008, [cit. 2014-05-12]. Dostupné z WWW: <<http://www.mitutoyo.com/pdf/1711.pdf>>.

- [12] MRŇA, L. Dělení materiálu laserem. *Strojárénstvo* [online]. Únor 2013 [cit. 2014-05-12]. Dostupné na WWW: <<http://www.engineering.sk/index.php/clanky2/stroje-a-technologie/1308-dleni-material-laserem>>.
- [13] TRUMPF. *Technical information: Laser processing CO2laser*. [online]. 2007, [cit. 2014-05-12]. Dostupné z WWW: <<http://www.trumpf-machines.com/en/about-trumpf/media-center/library/laser-and-laser-processing.html>>.
- [14] ZATLOUKAL, P. *Laserové dělení materiálu* [online]. 2007, [cit. 2014-04-11]. Dostupný na WWW: <<http://www.welding.cz/laser/deleni.htm>> .
- [15] *Caulfields* [online]. 2012. [cit. 2014-05-10]. Mitutoyo series 178 Surf tests SJ- 301. Dostupné z WWW: <<http://www.caulfieldindustrial.com/mitutoyo-series-178-surf-tests-sj301/p-f11120pd.html>>.
- [16] *Ferona* [online]. 2014 [cit. 2014-05-12]. Materiálové normy. Dostupné z WWW: <[http://www.ferona.cz/cze/katalog/mat\\_normy.php](http://www.ferona.cz/cze/katalog/mat_normy.php)>.
- [17] *Lao – průmyslové systémy, s.r.o.* [online]. 2014. [cit. 2014-05-12]. Laserové řezání. Dostupné z WWW: <<http://www.lao.cz/aplikace-79/laserove-rezani-80>>.
- [18] *Richardson Electronics* [online]. 2014 [cit. 2014-05-12]. TRUMPF. Dostupné z WWW: <<http://www.rellaser.com/trumpf-laser-parts.php>>.
- [19] *Skraw-Mech* [online]. 2011. [cit. 2014-05-12]. CO2-TRUMATIC TC L3050. Dostupné z WWW: <<http://www.skraw-mech.com.pl/en/machines/co2-trumatic-tc-l-3050>>.
- [20] *Trumpf* [online]. 2014. [cit. 2014-05-10]. 2D Laserová řezací zařízení. Dostupné z WWW: <<http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/obrabeci-stroje/produkty/rezani-2d-laserem/co2-nebo-pevnolatkovy.html>>.
- [21] *Trumpf* [online]. 2014 [cit. 2014-05-12]. Dostupné z WWW: <<http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/obrabeci-stroje/produkty/rezani-2d-laserem/laserova-rezaci-zarizeni.html>>.
- [22] *Trumpf* [online]. 2014. [cit. 2014-05-10]. TruLaser 5030 fiber/5040 fiber. Dostupné z WWW: <<http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/obrabeci-stroje/produkty/rezani-2d-laserem/laserova-rezaci-zarizeni/trulaser-5030-fiber.html>>.
- [23] Norma ČSN EN 12584 (05 3402), *Vady při řezání kyslíkem, laserem, plasmou - Terminologie*, duben 2001.

- [24] Norma ČSN EN ISO 4287, *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) : Struktura povrchu: Profilová metoda. Termíny, definice a parametry struktury povrchu*, duben 1999.
- [25] Norma ČSN EN ISO 9013 (05 3401), *Tepelné dělení – Klasifikace tepelných řezů – Geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti řezu*, říjen 2003.

## Seznam příloh

Příloha A	Specifikace materiálu ENAW5754H22.
Příloha B	Řezné parametry a naměřené hodnoty drsnosti Ra vzorků č.1 a č.2
Příloha C	Řezné parametry a naměřené hodnoty drsnosti Ra vzorků č.3 a č.4
Příloha D	Řezné parametry a naměřené hodnoty drsnosti Ra vzorků č.5 a č.6
Příloha E	Řezné parametry a naměřené hodnoty drsnosti Ra vzorků č.7; č.8 a č.9
Příloha F	Řezné parametry a naměřené hodnoty drsnosti Ra vzorků č.10 a č.11
Příloha G	Řezné parametry a naměřené hodnoty drsnosti Ra vzorků č.12 a č.13
Příloha H	Řezné parametry a naměřené hodnoty drsnosti Ra vzorků č.14 a č.15
Příloha I	Řezné parametry a naměřené hodnoty drsnosti Ra vzorků č.16 a č.17
Příloha J	Řezné parametry a naměřené hodnoty drsnosti Ra vzorků č.18 a č.19
Příloha K	Řezné parametry a naměřené hodnoty drsnosti Ra vzorků č.20 a č.21
Příloha L	Řezné parametry a naměřené hodnoty drsnosti Ra vzorků č.22 a č.23
Příloha M	Řezné parametry a naměřené hodnoty drsnosti Ra vzorků č.24 a č.25
Příloha N	Řezné parametry a naměřené hodnoty drsnosti Ra vzorků č.26 a č.27
Příloha O	Řezné parametry a naměřené hodnoty drsnosti Ra vzorků č.28 a č.29
Příloha P	Řezné parametry a naměřené hodnoty drsnosti Ra vzorků č.30 a č.31
Příloha Q	Řezné parametry a naměřené hodnoty drsnosti Ra vzorků č.32 a č.33
Příloha R	Řezné parametry a naměřené hodnoty drsnosti Ra vzorků č.34 a č.35
Příloha S	Řezné parametry a naměřené hodnoty drsnosti Ra vzorků č.36 a č.37

## **Poděkování**

Rád bych tímto poděkoval Ing.et Ing. Mgr. Janě Petřů, Ph.D. za ochotné a vstřícné podněty ke zpracování bakalářské práce a odborné vedení.

Dále bych rád poděkoval Bohumilu Venenému z firmy MRB Sazovice s.r.o. za umožnění provedení experimentu a Tomáši Matuškoví za odbornou asistenci při provádění experimentální části.

Na závěr nemohu opomenout svou rodinu a přítelkyni, kterým děkuji za jejich podporu po celou dobu studia.